融合贝叶斯网络与变权 AHP 的气量调控系统安全风险动态分析方法

董良遇[1] 张哲宇[1] 张进杰[2] 王瑶[2]

（1. 国家工业信息安全发展研究中心，北京，100040；

2. 高端机械装备健康监控与自愈化北京市重点实验室，北京化工大学，北京，100029）

摘要：针对往复压缩机组无级气量调控系统故障率较高、对机组安全运行影响大，而现有系统运行风险评价方法难以完成实时、定量分析的问题，提出一种融合贝叶斯网络与变权 AHP 的气量调控系统安全风险动态分析方法。建立了包含故障类型、故障模式与监测信号的贝叶斯网络模型，得到故障实时发生概率；基于变权层次分析法建立了故障危害性半定量分析模型，计算故障模式影响量化指标；进一步，修正了 FMEA 方法故障模式风险计算公式，引入故障发生概率，提出了历史故障与实时运行风险计算方法。以实际故障案例数据进行测试验证，结果表明：提出的新方法可量化计算机组实时与历史运行风险，设置归一化的实时运行风险阈值为 0.5，以判定检修必要性。研究成果可为往复压缩机及气量调控系统检维修计划的制定提供量化指标。

关键字：无级气量调控系统，贝叶斯网络，故障模式与影响分析，层次分析法，风险动态分析

Dynamic analysis method of safety risk of capacity control system based on bayesian network and variable weight AHP

DONG Liangyu[1] ZHANG Zheyu[1] ZHANG Jinjie[2] WANG Yao[2]

(1.China Industrial Control Systems Cyber Emergency Response Team, Beijing,100040)

(2. Beijing Key Laboratory of Health Monitoring Control and Fault Self-Recovery for High-end Machinery, Beijing University of Chemical Technology, Beijing, 100029)

Abstract: Aiming at the problem that the stepless capacity control system of reciprocating compressor has a high failure rate and great impact on the operation of the unit, and the existing risk assessment methods of the compressor operation are difficult to complete the real-time and quantitative risk assessment, a risk dynamic analysis method of the safety of stepless capacity control system was proposed, which integrated Bayes network and variable weight AHP. The Bayesian network model, which included fault type, fault mode and monitoring signal, was established to obtain the real-time probability of fault occurrence. Based on variable weight analytic hierarchy process (AHP), a semi-quantitative analysis model of fault hazard was established, and the influence index of fault mode was calculated. Further, the fault risk calculation formula of FMEA method was modified, the probability of fault occurrence was introduced, and the calculation method of historical fault and real-time operation risk was proposed. The results showed that the new method proposed in this paper could quantify the real-time and historical operating risks of computer units, and the normalized real-time operating risk threshold was setted as 0.5 to determine the need for maintenance. The research results can provide quantitative indexes for the establishment of inspection and maintenance plans for reciprocating compressors and gas volume regulation systems.

Key Words: Stepless capacity control system, Bayesian network, Failure mode and effect analysis, Analytic hierarchy process, Risk dynamic analysis

0 引言

往复压缩机组是炼油、化工等行业高耗能装备，在国家实现碳达峰、碳中和的战略目标牵引下，越来越多的往复压缩机组通过安装无级气量调控系统实现节能降耗运行。但是伴随系统应用，吸气阀故障、卸荷器故障、电磁控制阀故障、油站故障等频发，严重影响机组安全稳定运行。如何对气量调控系统进行风险评估成为企业关注的重点问题。

已有研究针对往复压缩机组无级气量调控系统开展故障分析。吕佳琪[1]针对往复压缩机无级气量调控系统吸气阀无法正常卸荷的故障，通过分析无级气量调控系统执行机构阀室活塞输出力、气阀在卸荷状态下卸荷杆反作用力、进气压力以及进气压差等各方面作用力的构成，找到故障原因；盛尊祥等[2]对压缩机无级气量调控系统卸荷杆填料磨损故障，核算螺栓预紧力，改进了安装结构，优化了卸荷杆对中；汪志农等[3]开展了往复压缩机气量调节控制失稳自愈调控方法研究，建立的多系统耦合控制模型，围绕执行机构复位弹簧故障、控制阀动态特性偏移建立了分类诊断模型与自愈调控机制；王瑶等[4]针对往复压缩机常见吸气阀故障导致气量调控失效问题，提出了一种基于调节域重构和负荷再分配的故障自愈调控策略；孙旭[5]等建立了包含进排气阀、气缸的往复压缩机 CFD 仿真模型，针对压缩机流量调控工况耦合排气阀泄漏故障，开展热力学性能仿真研究；张进杰等[6]构建了无级气量调节工况耦合压叉故障、吸气阀泄漏故障的压缩机工作模型，实现故障仿真模拟，获得了故障特征指标。气量调控系统

基金项目：重庆市技术创新与应用发展专项面上项目（cstc2020jscx-msxm0411）；中央高校基本科研业务费资助项目（XJ2023000901）

中已具有针对典型故障的控制功能，孙强[7]介绍了往复压缩机组无级气量调控系统在制氢压缩机上的应用，说明了系统针对典型故障的自动控制策略。现有研究多针对气量调控系统结构优化设计、故障诊断与控制策略等开展，未见针对气量调控系统安全风险的动态分析研究，系统与机组故障维修策略的针对性、实用性还有待提高。

其他领域，鲍晗等[8]提出了一种基于概率风险分析的航空发动机控制系统故障风险评估方法，从底层故障、发动机推力控制丧失事件和飞机级后果 3 个层次进行逐层评估；雷柏茂等[9]分析了中子管的主要故障模式，采用模糊综合评判和层次分析法（AHP）对中子管故障进行了多级模糊综合评判，并对中子管故障风险进行了评估；龚文涛等[10]提出了一种基于 LEC 的网络故障风险评估与分析策略，细化了网络故障因素，量化评估了故障的影响力。本文作者[11]提出了一种基于变权 AHP 的故障模式与影响半定量分析方法，实现了对往复压缩机典型故障影响的半定量分析。

本文以往复压缩机气量调控系统为研究对象，针对现有系统安全风险动态分析研究较少、不利于机组安全稳定运行的迫切问题，参考其他领域设备故障风险评估研究成果开展研究。提出了一种融合贝叶斯网络与变权 AHP 的气量调控系统安全风险动态分析方法，围绕系统典型故障模式，新建了基于贝叶斯网络的故障诊断模型，可得到不同故障实时发生概率；基于变权 AHP 方法定义了系统不同故障模式影响参数，进一步结合贝叶斯网络计算结果实现了故障模式风险动态分析，可量化计算机组实时与历史运行风险。实际故障案例数据验证表明，机组运行风险计算结果与实际故障发生、检修结论一致，取得了良好效果。

1 基于贝叶斯网络的运行状态分析模型

贝叶斯网络首先由 Pearl 提出，又称为信度网络或有向无环图模型，是贝叶斯方法的扩展[12]。贝叶斯网络属于概率图模型，由代表变量节点及连接这些节点的有向边构成，每个节点都携带了定量概率信息，同时在给定父节点下都符合一定的条件概率分布。

一个贝叶斯网络可用 $B(N,D,P)$ 表示，其中 N 代表网络中的全体节点，节点变量 x_i 可表达具体问题对象，对本文研究内容，可表达故障类型、故障模式、监测信号等；D 代表连接各节点对的有向边集合；P 代表每个节点的概率分布，可用 $P(x_i|Parents(x_i))$ 表示。网络中，没有输入的节点成为根节点，具有初始先验概率，其他有向边连接存在条件概率。对所有节点条件概率进行汇总，可建立条件概率表（Conditional Probabilities Table，CPT）。

贝叶斯网络指定了全联合概率分布，其中的每个条目都可以表示为贝叶斯网络 CPT 中相应元素的乘积，计算公式为：

$$P(x_1,x_2\cdots x_n)=\prod_{i=1}^{n}P(x_i|Parents(x_i)) \tag{1}$$

贝叶斯网络的推理计算过程为：

1）根据研究领域知识经验统计或案例数据学习，给出具体问题对象的先验概率和条件概率；

2）根据网络结构计算联合概率分布；

3）计算不同节点的边缘概率分布；

4）进行统计推理，根据贝叶斯公式计算不同已知条件组合状态下，研究问题成立的后验概率。贝叶斯公式一般表达为：

$$P(x_i|Z)=\frac{P(x_i)P(Z|x_i)}{\sum_{j=1}^{n}P(x_j)P(Z|x_j)},i=1,2,\cdots n \tag{2}$$

式中，Z 代表给定的证据变量；z 为变量 Z 的具体数值。

针对本文研究对象，根据历史故障案例数据梳理气量调控系统的故障类型 F、故障模式 M 与监测信号 S，如表 1 所示，并建立如图 1 所示的贝叶斯网络模型。网络模型 CPT 的数值由相关专家根据实际案例数据情况设置，假定不同节点之间都是条件独立的。

表 1　气量调控系统故障模式与监测信号

Tab. 1 Fault mode and monitoring signal of capacity control system

故障类型 F	故障模式 M	监测信号 S
机械部件故障	吸气阀泄漏、阀片断裂	吸气阀盖温度
	执行机构动作延时	缸体振动
液压系统部件故障	油站液位低	气缸吸气温度
	油泵机械故障	气缸排气温度
	油站电机机械故障	油站温度
	管路泄漏故障	油站压力
		油站液位
控制系统部件故障	控制系统软件故障	油站振动
	键相传感器故障	气缸吸气压力
	电磁控制阀性能退化	气缸排气压力
	控制器板卡故障	电路反馈特征
		键相转速特征

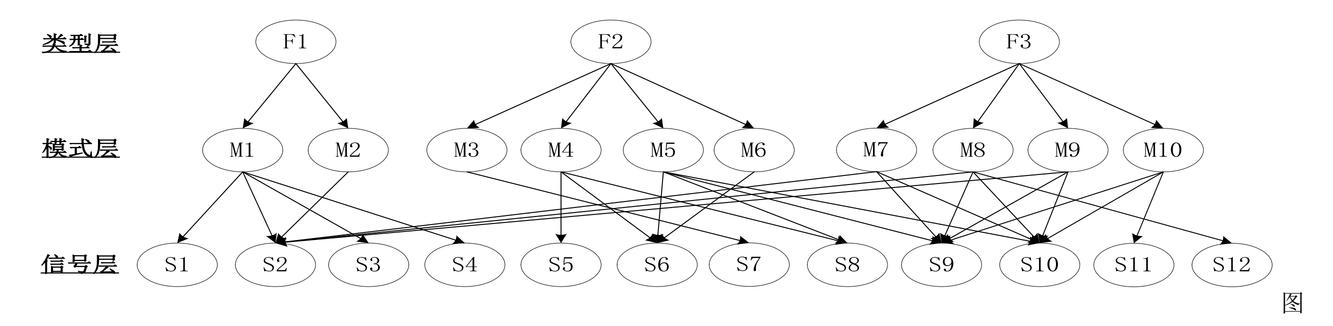


图 1 气量调控系统故障模式与监测信号贝叶斯网络模型

Fig.1 Failure mode and Bayesian network model of capacity control system

2 基于变权 AHP 的故障模式风险动态分析

基于变权层次分析法，综合安全影响、生产损失、维修成本和节能效果影响四方面因素完成往复压缩机气量调控系统各故障模式影响半定量分析。该分析方法运用了两两比较的方法，得到各故障模式的相对影响程度，减少了主观性、随意性和偏向性所带来的偏差。

2.1 基于变权 AHP 的故障模式影响分析

采用层次分析法将气量调控系统故障模式影响分析划分成三个层次，如图 2 所示，其中：目标层 A 为典型故障模式影响指数；准则层 B_i 分别为安全影响 B_1、生产损失 B_2、维修成本 B_3 和节能效果影响 B_4，其中安全因素为定性因素，采用最大损害度原则进行计算，其他因素可使用资金成本与节能效果等进行量化计算；指标层 C_i 为各故障模式。

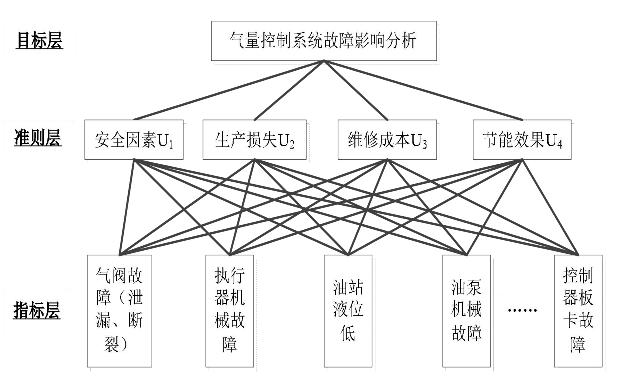


图 2 气量调控系统故障影响分析层次图

Fig.2 AHP diagram of capacity control system fault impact

安全影响 $u_{1i}=\max(u_{1ij})$：划分为 9 级，为一个大修周期（8000 小时）内故障模式 i 的 j 次故障安全影响统计中的最大值；

生产损失影响 $u_{2i}=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}u_{2ij}$：采用一个大修周期内，故障模式 i 导致的平均停车时间统计，n 代表故障发生次数；

维修费用影响 $u_{3i}=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}u_{3ij}$：采用以一个大修周期内，故障模式 i 导致的平均维修费用统计，n 代表故障发生次数。

节能效果影响 $u_{4i}=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}u_{4ij}$：采用以一个大修周期内，相对理想的节能效果，故障模式 i 导致的节能功率减少量平均值，n 代表故障发生次数。

以某炼油厂氢气往复压缩机组为对象，该机组额定功率 3000kW，工作转速 333 r/min，基于气量调控系统实际运行故障案例数据，对系统主要故障模式影响因素进行统计，结果如表 2 所示。

表 2 往复压缩机气量调控系统主要故障模式与影响因素统计表

Table 2 Main fault modes and influencing factors of capacity control system of reciprocating compressor

序号	故障模式	安全影响参数	生产损失单位/小时	维修费用单位/万元	节能效果影响单位/kWh
1	吸气阀泄漏、阀片断裂	6	6	3.2	101250
2	油泵机械故障	7	0	0.42	9282
3	油站电机机械故障	7	0	0.524	5712
4	键相传感器故障	9	4	0.14	50575
5	电磁阀性能退化	4	0	2.125	21420
6	控制器板卡故障	9	0	0.5	7140

根据表 2 中各故障模式影响因素的统计数据，将上述参数去量纲化，均以 1~9 标度做重要性程度赋值，建立两两比较矩阵，矩阵应包括同一影响因素内不同故障模式之间的比较，同时还应包括不同影响因素之间的比较。

1）同一影响因素内不同故障模式之间比较

$$U_{ri}^{'}=\left(\frac{u_{ri}}{u_{r1}},\frac{u_{ri}}{u_{r2}},\cdots,\frac{u_{ri}}{u_{rn}}\right)^{T} \quad (3)$$

式中：

r 代表影响因素类别；

i 代表故障模式类别。

得 $U_{r}^{'}=\left(U_{r1}^{'},U_{r2}^{'},\cdots,U_{ri}^{'}\right)$ （4）

求解矩阵 $U_{r}^{'}$ 最大特征值对应的特征向量 δ_r，即为影响因素 r 中不同故障模式的得分，得：

$$X=\left(\delta_1^T,\delta_2^T,\delta_3^T,\delta_4^T\right) \quad (5)$$

2）不同影响因素之间的比较

上述四种故障影响因素权重不同，安全和生产相比维修费用、节能效果更为重要，建立两两比较矩阵。

$$Y=\begin{bmatrix} Y_{11},Y_{21},Y_{31},Y_{41} \\ Y_{12},Y_{22},Y_{32},Y_{42} \\ Y_{13},Y_{23},Y_{33},Y_{43} \\ Y_{14},Y_{24},Y_{34},Y_{44} \end{bmatrix} \quad (6)$$

同上，求解矩阵 Y 最大特征值对应的特征向量 $\alpha=(\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3,\alpha_4)^T$，即为影响因素重要性的得分。

3）故障模式影响参数计算

由于层次分析法一般采用常权评价，常权综合评价结果为：

$$\beta^0=X\alpha=\left(\beta_1^0,\beta_2^0,\cdots\beta_i^0\right) \quad (7)$$

常权综合评价方法只突出主要因素，缺乏极端情况的故障模式危害度，故兼顾极端情况和主要因素对 AHP 所得权重值进行变权修正[11]，变权结果为：

$$\alpha_r^{'}=\alpha_r x_r^{k-1}\Big/\left(\sum_{r=1}^{4}\alpha_r x_r^{k-1}\right) \quad (8)$$

$$\beta=X\alpha^{'}=\left(\beta_1,\beta_2,\cdots,\beta_i\right) \quad (9)$$

4）矩阵一致性检验

针对上述两两比较矩阵，确定单一因素权重后，根据一致性指标公式 $CI=\frac{\lambda_{max}-n}{n-1}$ 和一致性比率公式 $CR=\frac{CI}{RI}$，进行矩阵一致性检验。

其中：λ_{max} 为矩阵的最大特征根；n 为判断矩阵阶数；RI 为平均随机一致性指标。CI 越小，说明判断矩阵的一致性越大；当所得 $CR<0.1$，即该故障模式判断矩阵的一致性可以接受。

根据上述计算方法，利用表 2 中的数据分别计算得到安全影响参数判断矩阵、生产损失判断矩阵、维修费用判断矩阵、节能效果影响判断矩阵。经计算所有判断矩阵的一致性指标 CI、CR 如表 3 所示，一致性的指标均符合要求。

表 3　判断矩阵的一致性指标 CI,CR 计算结果

Table 3 Calculation results of CI,CR of judgment matrix

序号	判断矩阵	CI	CR
1	安全影响参数判断矩阵	0.079874497	0.064414917
2	生产损失判断矩阵	0.01310046	0.010564887
3	维修费用判断矩阵	0.041141033	0.033178252
4	节能效果影响判断矩	0.009909457	0.007991498

进一步，计算得到 6 类故障模式的故障模式影响参数结果如表 4 所示。

表 4　往复压缩机气量调控系统部分故障模式与影响分析结果

Table 4 Partial failure modes and influence analysis results of gas capacity control system of reciprocating compress

序号	故障类型	故障模式	故障部件	故障模式影响参数	归一化故障模式影响参数
1	机械部件故障	吸气阀泄漏、阀片断裂	吸气阀	0.199752835	0.579629683
2	液压系统部件故障	油泵机械故障	油站油泵	0.088862129	0.257854302
3		油站电机机械故障	油站电机	0.071035196	0.206125274
4	控制系统部件故障	键相传感器故障	键相传感器	0.344621474	1
5		电磁阀性能退化	油路控制阀	0.059545521	0.17278529
6		控制器板卡故障	控制系统硬件	0.236182844	0.685339894

2.2 故障模式风险动态分析

传统故障模式和影响分析（Failure Mode and Effect Analysis，FMEA）方法中，机械系统零部件的故障危害度 W 计算公式可用如下公式表达：

$$W=\sum_{i=1}^{n}H_i=\sum_{i=1}^{n}K_i t C_i\text{，}\ i=1\text{，}2\text{，}\cdots\text{，}\ n \qquad (10)$$

式中：

H_i：　故障模式 i 的危害度指数；

K_i：　故障模式 i 单位时间内发生的频率；

t：　计算的时间范围；

C_i：　故障模式 i 引起机械系统故障的损失指数。

在上述公式基础上，定义了气量调控系统运行风险计算公式。

1）历史故障风险计算方法

历史故障风险的计算指的是根据历史的案例数据，对一定时间段内的设备故障情况进行统计，根据故障发生频次与不同故障影响计算设备未来运行风险。对公式（10）进行改进，故障模式 i 危害度计算公式进行修正：

$$H_i=\beta_i K_i t \qquad (11)$$

一定时间段内，气量调控系统整体故障危害度为：

$$W_{历史}=\sum_{i=1}^{n}H_i=\sum_{i=1}^{n}\beta_i K_i t\text{，}\ i=1\text{，}2\text{，}\cdots n \qquad (12)$$

公式（12）可应用于不同往复压缩机组的气量调控系统单位运行时间内的风险分析，从而确定运行风险等级较高的机组，并在设备维护管理方面进行重点关注。

2）实时运行风险计算方法

基于贝叶斯网络的运行状态分析模型计算结果，获得实时运行状态下气量调控系统故障模式 i 的发生概率 $P(i)$，结合变权 AHP 的故障模式影响分析结果，实时运行风险计算可使用公式（13）完成。

$$W_{实时}=\sum_{i=1}^{n}H_i^{'}=\sum_{i=1}^{n}P_i\beta_i \qquad (13)$$

式中：

$H_i^{'}$：　实时状态下故障模式 i 的危害度指数；

P_i：　实时状态下故障模式 i 发生的概率；

可基于不同故障模式的危害影响计算结果，设定相应的门限阈值，划分风险等级，分别对应停机维修、密切跟踪、正常运行等操作。进一步将系统实时运行风险计算值与门限值进行对比，根据风险等级完成相应处理。

3 实际案例应用

以前文所述的炼油厂氢气往复压缩机组为研究对象，机组为 AB 两台，均安装了无级气量调控系统，机组实际照片如下图所示。



图 3　现场往复压缩机与无级气量调控系统

Fig.3 Reciprocating compressor and stepless capacity control system

提取 AB 两台机组气量调控系统在 8000 小时运行周期内不同故障的发生情况，具体统计如下表 5 所示：

表 5　A/B 两台机组气量控制系统故障发生情况

Table 5 Failure occurrence of capacity control system of A/B units

故障模式	A 机组发生次数	B 机组发生次数
吸气阀泄漏、阀片断裂	2	1
键相传感器故障	1	0
控制器板卡故障	0	0
油泵机械故障	0	0
油站电机机械故障	1	0
电磁阀性能退化	2	2

考虑到机组实时运行状态下遇到故障几率较小，采用历史故障案例数据回放模拟实时数据，对本文提出的方法进行验证。机组两次典型故障历史数据如图 4、图 5 所示。从图 4 中可以看出，随着运行时间不断增加，吸气阀的密封性能逐渐发生劣化，气体泄漏量逐渐增大，气阀温度不断升高。从图 5 的振动冲击相位可以看出，随着运行时间的延长，电磁阀性能逐渐退化，导致气阀关闭出现明显滞后。根据历史案例知识，设置故障报警限值，当存在监测参数超过报警限值后触发前文贝叶斯故障诊断模型，获得不同故障诊断发生概率。

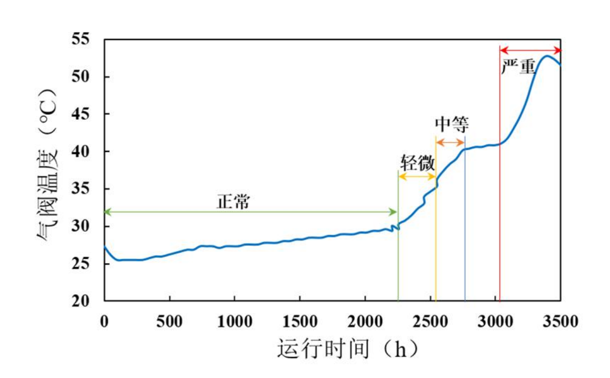


图 4　气量调控系统故障 1—气阀故障历史数据

Fig.4 Capacity control system fault 1- the gas valve fault history data

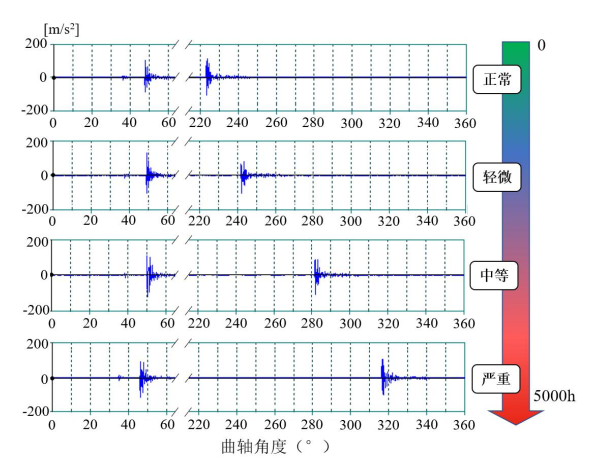


图 5　气量调控系统故障 2—电磁阀性能退化历史数据

Fig.5 Capacity control system fault 2- the solenoid valve performance degradation history data

分别对历史故障风险、实时运行风险进行计算，机组历史故障风险计算结果如图 6 所示，可对 AB 机组历史故障风险进行量化计算，为现场检维修工作、主备机选择提供依据。

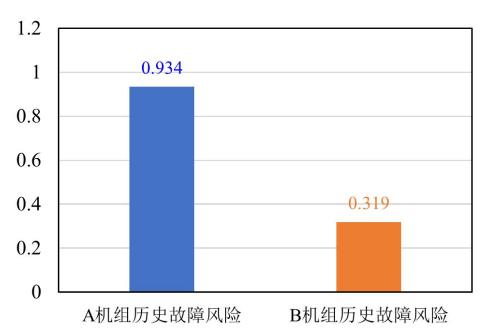


图 6　A/B 两台机组历史故障风险计算结果

Fig.6 Historical fault risk calculation results of A/B units

表 6　气阀故障案例数据运行风险计算结果

Table 6 Operation risk calculation results of the gas valve fault

故障模式	故障模式影响指数	故障发生概率	故障模式下危害度指数
吸气阀泄漏、阀片断裂	0.579629683	0.95	0.550648199
键相传感器故障	1	0.001	0.001
控制器板卡故障	0.685339894	0.04	0.027413596
油泵机械故障	0.257854302	0.01	0.002578543
油站电机机械故障	0.206125274	0.01	0.002061253
电磁阀性能退化	0.17278529	0.13	0.022462088
实时运行风险计算结果			0.606163678

表 7　电磁阀性能故障案例数据运行风险计算结果

Table 7 Operation risk calculation results of the solenoid valve performance degradation

故障模式	故障影响指数	故障发生概率	故障模式下危害度指数
吸气阀泄漏、阀片断裂	0.579629683	0.15	0.086944452
键相传感器故障	1	0.001	0.001
控制器板卡故障	0.685339894	0.04	0.027413596
油泵机械故障	0.257854302	0.01	0.002578543
油站电机机械故障	0.206125274	0.01	0.002061253
电磁阀性能退化	0.17278529	0.77	0.133044674
实时运行风险计算结果			0.253042517

从表 6、表 7 可看出，使用贝叶斯网络基于各类监测参数对气量调控系统进行故障分析诊断，得到不同故障发生概率，结合不同故障模式影响参数，计算气量调控系统实时运行风险，从而对气量调控系统当前运行风险进行量化分析，并指导检维修。一般情况下，可设置实时运行风险阈值为 0.5，超过 0.5 即需要对气量调控系统进行关注并实施必要检修。

4 结论

（1）本文以往复压缩机气量调控系统为研究对象，针对系统故障检修计划依赖人工经验制定、缺乏量化指标、精细化管理不足等问题，建立了一种融合贝叶斯网络与变权 AHP 的气量调控系统安全风险动态分析方法。梳理了故障模式与监测信号对应关系，构建了基于贝叶斯网络的故障分析诊断模型，获得不同故障模式发生概率；采用层次分析法，围绕安全影响、生产损失、维修成本、节能效果等方面完成了故障危害半定量分析，得到了不同故障模式影响的 0-1 归一化评价指标。

（2）基于历史故障发生频率、贝叶斯网络故障自动诊断结果分别定义了机组运行历史故障风险和实时运行风险计算方法。机组运行历史故障风险计算结果可用于对不同机组气量调控系统运行风险进行评估，优化不同机组开停机及气量调控系统投用策略；实时运行风险计算结果可用于评估气量调控系统当前运行状态，制定检维修计划。

（3）实际案例数据应用证明，本文方法利用机

组温度、压力、振动等实际监测参数，实现了对吸气阀故障、键相传感器故障、控制器板卡故障等气量调控系统主要故障模式的自动诊断；结合不同故障模式影响参数完成了机组运行历史故障风险和实时运行风险计算，并设置实时运行风险阈值为 0.5，可指导往复压缩机组及气量调控系统检维修计划制定。机组运行风险计算结果与实际故障发生、检修结论一致性较好。

参 考 文 献

[1] 吕佳琪. 往复式压缩机无级气量调节系统故障分析[J]. 化工管理, 2021, 32: 120-121.LV J Q.Fault analysis of stepless gas volume regulating system of reciprocating compressor[J]. Chemical Enterprise Management,2021,32:120-121.

[2] 盛尊祥, 赵永兴, 孟玉清, 等. 无级气量调节系统卸荷杆填料密封失效的研究与对策[J]. 压缩机技术, 2013, 241(05): 66-68.SHENG Z X,ZHAO Y X,MENG Y Q, et al.Research and countermeasures on the failure of packing seal of unloading rod in stepless gas regulating system[J].Compressor Technology,2013,241(05):66-68.

[3] 江志农, 周超, 张进杰, 等. 往复压缩机气量调节控制失稳自愈调控方法研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(22): 131-141.JIANG Z N,ZHOU C,ZHANG J J,et al.Study on self-healing control method of instability in gas volume control control of reciprocating compressor[J].Journal of Mechanical Engineering,2020,56(22):131-141.

[4] 王瑶, 张进杰, 周超, 等. 往复压缩机气阀故障条件下气量调节失效的自愈调控方法研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(12): 267-274.WANG Y,ZHANG J J,ZHOU C,et al.Research on self-healing control method of gas volume regulation failure under the condition of reciprocating compressor valve failure[J]. Journal of Mechanical Engineering,2021,57(12):267-274.

[5] 孙旭, 刘晓明, 李磊, 等. 往复压缩机流量调控工况下排气阀泄漏仿真研究[J]. 流体机械, 2021, 49(8): 100-104.SU X,LIU X M,LI L,et al.Simulation study on exhaust valve leakage of reciprocating compressor under flow control condition[J].Fluid Machinery,2021,49(8):100-104.

[6] 张进杰, 袁玉清, 李青, 等. 无级气量调节工况耦合气阀故障对压缩机工作影响分析及试验验证[J]. 流体机械, 2023, 51(5): 63-69+76.ZHANG J J,YUAN Y Q,LI Q,et al.Analysis and test verification of the influence of coupling valve fault on compressor operation under stepless gas volume regulation condition[J].Fluid Machinery,2023,51(5):63-69+76.

[7] 孙强. 气量无级调节系统在制氢原料气压缩机上的应用研究[J]. 中国设备工程, 2021, 17: 143-144.SUN Q.Study on the application of stepless gas volume control system in hydrogen production feedstock gas compressor[J].China Plant Engineering,2021,17:143-144.

[8] 鲍晗, 左洪福, 蔡景, 等. 基于概率风险分析的航空发动机控制系统故障风险评估[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(10): 38-43.BAO H,ZUO H F,CAI J,et al.Failure risk assessment of aero-engine control system based on probabilistic risk analysis[J].Journal of Ordnance Equipment Engineering,2018,39(10):38-43.

[9] 雷柏茂, 李江燕, 梁佩博, 等. 基于模糊综合评判和层次分析法的中子管故障风险评估[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(11): 2247-2256.BAO L M,LI J Y,LIANG P B,et al.Failure risk assessment of neutron tube based on fuzzy comprehensive evaluation and analytic hierarchy process[J].Atomic energy science and technology,2019,53(11):2247-2256.

[10] 龚文涛, 魏秀英, 肖天航, 等. 一种基于 LEC 的网络故障风险评估与分析策略[J]. 计算技术与自动化, 2022, 41(2): 147-152.GONG W T,WEI X Y,XIAO T H,et al.A network fault risk assessment and analysis strategy based on LEC[J]. Computing Technology and Automation,2022,41(2):147-152.

[11] 董良遇, 王庆锋, 张赟新, 等. 一种基于变权 AHP 的故障模式与影响半定量分析方法[J]. 流体机械, 2016, 44(5): 51-55+82.DONG L Y,WANG Q F,ZHANG Y X,et al.A semi-quantitative analysis method of fault mode and influence based on variable weight AHP[J].Fluid Machinery,2016,44(5):51-55+82.

[12] 贾进章, 陈怡诺, 柯丁琳. 基于模糊集和改进DS证据理论的危化品道路运输体系贝叶斯网络风险分析[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2020, 47(01): 38-45.JIA J Z,CHEN Y N,KE D L. Bayesian network risk analysis of road transport system for hazardous chemicals based on fuzzy set and improved DS evidence theory[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition),2020,47(01):38-45.

作者简介：董良遇（1989），女，工程师，主要从事工控安全、工业互联网安全、数据安全等方面的研究。通信地址：100040 北京市石景山区鲁谷路 35 号国家工业信息安全发展研究中心，E-mail：dongliangyu78@163.com。